



Universidad
Carlos III de Madrid



This is a postprint version of the following published document:

Corcoba Magaña, Víctor; Muñoz Organero, Mario (2014). “Algoritmo para el cálculo de la velocidad media óptima en una ruta (ASGA)”, *en Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, volumen:11, número: 4 Octubre-Diciembre, páginas: 435-443.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2014.08.004>

© 2014. CEA. Publicado por Elsevier España, S.L.U.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

Algoritmo para el cálculo de la velocidad media óptima en una ruta (ASGA)

V. Corcoba Magaña ^{a,*}, M. Muñoz Organero ^a

^a Departamento de Ingeniería Telemática, Universidad Carlos III de Madrid, C/ Avenida de la Universidad, 30, 28911 Leganés, España.

Resumen: En este trabajo se propone un algoritmo para obtener la velocidad media óptima para ahorrar combustible y mejorar la seguridad. El algoritmo propuesto se basa en los algoritmos genéticos. El algoritmo emplea información sobre el entorno, la carretera y el vehículo para obtener la velocidad media que minimice el consumo de combustible sin incrementar drásticamente la duración del trayecto. Además, el algoritmo propuesto mejora la seguridad ya que adecua la velocidad a las condiciones de la vía. La información sobre el entorno se obtiene de servicios web y la información sobre el vehículo se obtiene a través del puerto OBD2. El algoritmo es validado en situaciones reales con incidentes de tráfico y sin ellos. Por otra parte, se analiza el impacto de la velocidad media y los incidentes de tráfico en las aceleraciones y su influencia en el consumo de combustible.

Palabras Clave: Conducción eficiente, Sistemas de ayuda a la conducción, Algoritmos Genéticos, Android, Sistemas Inteligentes de Transporte.

Title: ASGA: Algorithm to obtain the optimal average speed on a route

Abstract: This paper proposes an algorithm for obtaining the optimal average speed to save fuel and improve safety. The proposed algorithm is based on genetic algorithms. The algorithm uses information about the environment, the road and the vehicle for obtaining the optimal average speed which it minimizes fuel consumption without dramatically increasing the travel time. Moreover, the proposed algorithm improves safety adapting vehicle speed to road conditions. The environment information is obtained from web services and vehicle information is obtained through the OBD2 port. The algorithm is validated in situations with and without incidents. In addition, we analyze the impact of the average speed and acceleration incidents and their impact on fuel consumption.

Keywords: Eco-driving, Advanced Driver Assistance Systems, Genetic Algorithms, Android, Intelligent Transport System.

1. Introducción

El eco-driving es una técnica de conducción que permite ahorrar combustible, optimizando el comportamiento del conductor en la conducción. Esta técnica permite ahorrar combustible con independencia de la tecnología y consiste en la aplicación de un conjunto de reglas tales como: mantener una velocidad constante, evitar acelerar y frenar bruscamente, circular con marchas altas y conducir a una velocidad máxima de 90 Km/h. Aplicando estas reglas de conducción podremos ahorrar entre un 5% y un 25% de combustible [Mukay and Kanoh, 2008, Barbé and Boy, 2006, Van Mierlo et al, 2004, Koskinen, 2008, Johansson et al., 2003].

Sin embargo, esta técnica de conducción debe afrontar varios retos:

- El usuario debe conocer las reglas eco-driving: En las autoescuelas no suelen enseñar a conducir eficientemente por lo que el conductor podría adquirir malos hábitos de conducción desde el punto de vista del consumo de combustibles. Cambiar estos hábitos es muy difícil.
- El usuario tiene que estar motivado: Algunos autores [af Wahlberg, 2007] han observado que los conductores olvidan o no se sienten motivados a aplicar las reglas de

eco-driving. La retroalimentación continua de conocimiento eco-driving mejora y mantiene los efectos del aprendizaje.

- Algunos consejos eco-driving podrían entrar en conflicto con la seguridad: Por ejemplo, reducir el uso de los frenos y circular con marchas altas podría tener efectos adversos sobre el control del vehículo. [Harworth, 2001] identificó un conjunto de factores asociados con el vehículo, el conductor y el entorno que afectan a la seguridad y/o al consumo energético. No obstante hay un gran número de consejos eco-driving que influyen de forma positiva en la seguridad y en el consumo de combustible.
- No hay consenso sobre las reglas eco-driving: Cada fabricante de vehículos y país ha definido sus propias reglas eco-driving. Sin embargo, todos están de acuerdo que para ahorrar combustible es necesario reducir el número de aceleraciones y desaceleraciones innecesarias.
- El ahorro de combustible depende del tipo de vehículo: El tipo de vehículo influye de forma directa en el porcentaje de ahorro de combustible que se consigue aplicando los consejos eco-driving. Por ejemplo, en los vehículos híbridos se estima que el ahorro de combustible es entre un 5% y un 10%. Además, los consejos eco-driving varían según el modelo de vehículo [Lindfeldt, 2010].

En la literatura, hay un gran número de propuestas que tratan diversos aspectos del eco-driving. Algunos autores intentan

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: vcorcoba@it.uc3m.es (V. Corcoba Magaña),
URL: www.enti.uc3m.es (V. Corcoba Magaña)

encontrar los parámetros que afectan al consumo de combustible y en qué grado influyen. [Ericsson, 2001] concluyó que para ahorrar combustible, el conductor debe evitar las aceleraciones bruscas y conducir a alta velocidad. [Johansson et al., 2003] propusieron para ahorrar combustible mantener los niveles de desaceleración bajos, minimizar el uso de la primera y segunda marcha, incrementando el uso de la quinta marcha, y evitar los cambios innecesarios de marcha. [Kushler and Karstens, 1978] identificaron las diez variables que más influyen en el consumo de combustible y en la emisión de gases contaminantes.

Por otra parte, hay investigadores que evalúan el impacto de la aplicación del eco-driving en el consumo de combustible [Van Mierlo, 2004]. Otros autores proponen métodos para evaluar la conducción desde el punto de vista de la conducción eficiente. En [Villeta et al., 2012] propusieron utilizar lógica difusa para evaluar el cumplimiento de las reglas de conducción eficiente.

Otra forma de abordar el eco-driving es influir en los parámetros (velocidad, aceleración y marca) que el conductor puede controlar. [Saboo et al., 2009] propusieron una estrategia de control para ahorrar combustible. El algoritmo propuesto determina en cada instante la velocidad y marcha más adecuada

[Casavola et al., 2010] analizaron dos algoritmos que obtienen la marcha más adecuada para ahorrar combustible. El primer algoritmo (EGA) se basa en un mapa de eficiencia energética, y el segundo algoritmo (GFA) emplea un algoritmo genético y lógica difusa para obtener la marcha óptima. Para comparar el resultado de los algoritmos, los autores emplearon el ciclo de conducción NEDC (New European Driving Cycle). Las conclusiones fueron que los dos algoritmos intentaban siempre emplear la marcha más alta. El ahorro de combustible fue de 9,14% empleando el algoritmo EGA, y de un 10,97% usando el algoritmo GFA.

[Barth et al., 2009] propusieron un algoritmo para obtener la velocidad óptima basándose en un sistema de información en tiempo real sobre el tráfico. Aplicando el algoritmo propuesto consiguieron ahorrar entre un 10 y un 20 % de combustible.

En este artículo, nosotros proponemos emplear un asistente que recomienda la velocidad media más adecuada en todo momento. Por tanto, este trabajo se encuentra dentro del contexto de estrategias de control óptimas. Nosotros empleamos un algoritmo genético que usa información sobre el entorno y el vehículo para obtener la velocidad media óptima de cada sección del trayecto. El conductor debe intentar conducir a la velocidad media recomendada para ahorrar combustible.

Los algoritmos genéticos son una buena solución para estimar la velocidad óptima porque no requieren tener conocimiento sobre el problema a resolver a diferencia de la lógica difusa. En la lógica difusa es necesario contar con una base de conocimiento o un experto para definir las reglas del sistema difuso. Por otra parte, el tiempo de ejecución es menor que otros algoritmos evolutivos como la evolución diferencial [Hegerty et al., 2009] aunque el resultado sea peor en términos de robustez. No obstante, durante las pruebas se observó que al ejecutar el algoritmo múltiples veces, la desviación estándar de los resultados obtenidos era un valor pequeño. Finalmente, este tipo de algoritmos se puede ejecutar de forma paralela mejorando el tiempo de respuesta y la fiabilidad de la solución. Los dispositivos móviles actuales cuentan con procesadores multi-núcleo por lo que sería posible aprovechar este tipo de arquitectura para ejecutar el algoritmo propuesto. Debido a todas estas ventajas, se decidió emplear un esquema de algoritmo genético para estimar la velocidad media óptima.

2. Conceptos teóricos

El objetivo del sistema propuesto es ahorrar combustible adaptando la velocidad media del vehículo a las condiciones actuales de la carretera. La velocidad del vehículo no siempre es la más adecuada para la seguridad y el ahorro de energía. Por ejemplo, si hay tráfico denso la velocidad del vehículo debe ser más baja que la habitual para reducir el número de desaceleraciones bruscas. Por otra parte, si la velocidad del vehículo es demasiado baja, el vehículo consumirá más ya que se incrementa la duración del trayecto e incluso podría producir situaciones peligrosas.

En las carreteras podemos encontrar señales de tráfico que recomienden una velocidad determinada. El problema es que estas señales son estáticas y no tienen en cuenta factores dinámicos como el tráfico y las condiciones meteorológicas.

A continuación, vamos a revisar los principios básicos sobre dinámica del vehículo para determinar los principales factores que influyen en la pérdida de energía

2.1. Principios fundamentales de la dinámica de vehículos

En los vehículos, la mayoría de la energía producida durante la combustión se desperdicia. Las pérdidas de energía se deben a:

- Sistema de refrigeración: La temperatura de los componentes del motor debe ser adecuada para que funcione correctamente.
- Tubo de escape: Los gases emitidos por el tubo de escape suponen un 30% de pérdida de energía.
- Pérdidas mecánicas: La fricción de los componentes del motor y la bomba de gasolina consumen un 15% de la energía.

Las pérdidas de energía descritas anteriormente son inevitables, por los que a las ruedas del vehículo sólo llega el 30 % de la energía producida durante la combustión. Además, está energía es aún menor debido a las fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo.

Las fuerzas que se oponen al movimiento son:

$$F_t = F_a + F_f + F_r + F_s \quad (1)$$

donde F_a es la fuerza de resistencia a la aceleración, F_f es la fricción aerodinámica, F_r es la fuerza de resistencia a la rotación, F_s es la fuerza de resistencia debido a la pendiente de la carretera y F_t es la fuerza total que se opone al movimiento.

Por tanto, la energía obtenida por la combustión del combustible es:

$$E_w = E_p - E_e + E_m + E_r \quad (2)$$

donde E_p es la energía producida durante la combustión, E_e es la energía perdida por el motor, E_m es la energía perdida por los sistemas auxiliares y la mecánica, E_r es la energía perdida por la resistencia al movimiento y E_w es la energía que las ruedas reciben.

Observando las ecuaciones podemos concluir que si reducimos las aceleraciones innecesarias y moderamos la velocidad, podremos reducir el consumo de combustible. Cuando se incrementa la velocidad, las fuerzas que se oponen al movimiento también se incrementan, sobretudo la resistencia aerodinámica que se incrementa de forma cuadrática con la velocidad.

Sin embargo, debemos tener en cuenta que si reducimos la velocidad, la duración del viaje se incrementará, y por lo tanto, aunque el consumo instantáneo de combustible sea menor, el consumo de combustible total será mayor.

Por otra parte, las condiciones meteorológicas influyen de forma directa en el consumo de combustible. Por ejemplo, si el viento sopla en dirección contraria al movimiento del vehículo, se incrementará el coeficiente de resistencia aerodinámica, con el consecuente aumento de la fuerza que se opone al movimiento del vehículo. Del mismo modo, si hace frío la densidad del aire será mayor y por lo tanto el coeficiente de resistencia aerodinámico y la fricción serán peor.

En este contexto proponemos un sistema que estima la velocidad media óptima para cada tramo de una ruta. La velocidad óptima es la que minimiza el consumo de combustible. El sistema emplea un algoritmo genético para obtener la velocidad media óptima teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas y de la carretera. El feedback que provee el sistema al conductor permite reducir el consumo de combustible y la densidad de tráfico. Además, la velocidad media de los vehículos que circulan por la carretera se verá incrementada.

Aunque la velocidad no es el único parámetro que afecta al consumo de combustible, si es uno de los más decisivos porque influye de forma directa en otros factores como la aceleración, desaceleraciones y la seguridad (control sobre el vehículo).

3. Algoritmo ASGA (Average Genetic Algorithm)

El algoritmo ASGA propuesto para obtener la velocidad media óptima se basa en los algoritmos genéticos. Este tipo de algoritmos consta de un conjunto de etapas bien definidas: representación, función de optimización, inicialización, selección, cruce, mutación y reemplazamiento. A continuación describiremos cada una de las etapas.

Representación: El problema de optimización se define como un problema de optimización combinatorio donde los individuos se representan como vectores. Cada posición del vector representa un tramo del viaje y contiene la velocidad media en dicho tramo y el tiempo que tarda en completarlo (duración) asumiendo que el vehículo circula a dicha velocidad de forma constante. Por ejemplo, en la tabla 1, la segunda posición del vector indica que el vehículo debe circular a 90 Km/h en el segundo tramo del viaje y tardará 200 segundos en completarlo.

Tabla 1: Representación de un individuo de la población

Tramo	1	2	3
Velocidad Media (Km/h)	25	90	65
Tiempo requerido para completar el tramo (segundos)	1000	200	234

Función de optimización: Para evaluar las soluciones empleamos una función cuyos parámetros de entrada son: peso del vehículo, velocidad, coeficiente de penetración aerodinámica, superficie frontal del vehículo, número de paradas estimadas e incidencias. La función de optimización se define como:

$$F(x) = cb * \frac{d}{s} + \frac{p*1000}{l} \quad (3)$$

donde cb es el consumo de combustible estimado, d es la duración del trayecto circulando a la velocidad v , s es una constante que depende del estado de la carretera, p es el número

de paradas estimadas y l es la longitud del tramo. Para obtener el consumo de combustible empleamos (4).

$$cb(x) = 0.09 * C_e * \frac{p}{v} \quad (4)$$

donde C_e es el consumo específico y p es la potencia necesaria para circular a la velocidad v . El consumo específico depende del par y de las revoluciones por minuto. Nosotros suponemos que estas dos variables son constantes y dicha constante es 1. La potencia necesaria para circular a una velocidad v se puede calcular empleando (5).

$$p = \frac{RR+RS+RA}{75*ef} \quad (5)$$

donde RR es la resistencia a la rodadura (6), RS es la resistencia debido a la pendiente (7), RA es la resistencia aerodinámica (8) y ef es la eficiente en la transmisión (valor entre 0.80 y 0.85).

$$R = p * \beta \quad (6)$$

donde p es el peso del vehículo en kilogramos y β es el coeficiente de rodadura que depende del tipo de pavimento y la presión de los neumáticos.

$$RS = p * \sin \alpha \quad (7)$$

donde α es la pendiente de la carretera. Para obtener la pendiente empleamos el GPS del dispositivo móvil Android.

$$RA = \frac{1}{16} * C_x * S * v^2 \quad (8)$$

Donde C_x es el coeficiente de penetración aerodinámica que depende del vehículo y S es la superficie frontal del vehículo en m^2 .

Inicialización: La población inicial se puede obtener mediante experimentos previos o de forma aleatoria. En nuestro caso la población inicial se genera de forma aleatoria teniendo en cuenta los límites de velocidad de cada una de las secciones que componen el trayecto. La población se genera de forma aleatoria para hacer el espacio de búsqueda tan amplia como sea posible. Cada individuo de la población tiene dos variables: velocidad y duración. La velocidad se obtiene de forma aleatoria. La duración de cada sección del trayecto se obtiene suponiendo que el vehículo circula constantemente a la velocidad generada aleatoriamente.

Selección: El algoritmo elige los " k " individuos con mejor fitness. A continuación, se seleccionan los " t " individuos con el menor tiempo de trayecto de la población " k ". El objetivo es que la solución tenga un tiempo de trayecto razonable.

Cruce: Las parejas que se van a cruzar se eligen de forma aleatorio, pero no se puede cruzar un individuo consigo mismo. La duración del trayecto y la velocidad del hijo se obtienen de la media de las velocidades de los padres.

Mutación: Cada hijo obtenido en la etapa de cruce tiene una probabilidad " k " de ser reemplazado por un individuo generado de forma aleatorio (respectando los límites de velocidad). El objetivo es ampliar el espacio de búsqueda para evitar soluciones locales.

Reemplazamiento: La nueva población reemplaza a los individuos con peor fitness de la población anterior.

Condición de parada: El algoritmo se detendrá cuando la diferencia entre el valor de fitness del mejor elemento de la generación nueva y de la generación anterior solo difieran 0.01.

4. Resultados

Esta sección muestra los resultados obtenidos empleando el algoritmo propuesto. En la primera parte se describirán los elementos necesarios para llevar a cabo las pruebas. A continuación, analizamos cómo influyen las condiciones de la carretera en la velocidad media y en el consumo de combustible. Finalmente, comparamos los resultados obtenidos durante las pruebas empíricas con el resultado obtenido por el algoritmo propuesto.

4.1. Ruta y materiales

Para realizar las pruebas empleamos tres vehículos: Citroen Xsara Picasso 1.6 HDI (Ruta A), Xsara Picasso 2.0 HDI (Ruta B) y Citroen C5 140 HDI (Ruta C). En las tablas 2, 3, y 4 podemos ver las características de los vehículos.

Tabla 2: Características técnicas de Citroen Xsara Picasso 1.6

Potencia Máxima (caballos)	110
Peso (Kg)	1313
Consumo urbano (L/100Km)	6.3
Consumo extraurbano (L/100 Km)	4.1
Consumo Mixto(L/100Km)	4.9
Superficie frontal del vehículo (m ²)	2.37
Coefficiente de penetración aerodinámica	0.33

Tabla 3: Características técnicas de Citroen Xsara Picasso 2.0

Potencia Máxima (caballos)	90
Peso (Kg)	1300
Consumo urbano (L/100Km)	7.0
Consumo extraurbano (L/100 Km)	4.6
Consumo Mixto(L/100Km)	5.5
Superficie frontal del vehículo (m ²)	2.37
Coefficiente de penetración aerodinámica	0.33

Tabla 4: Características técnicas de Citroen C5 140 HDI

Potencia Máxima (caballos)	140
Peso (Kg)	1683
Consumo urbano (L/100Km)	7.4
Consumo extraurbano (L/100 Km)	4.7
Consumo Mixto(L/100Km)	5.7
Superficie frontal del vehículo (m ²)	2.30
Coefficiente de penetración aerodinámica	0.31

La ruta A fue entre Getafe y Leganés (España). La distancia del trayecto es 9.18 Km y la duración 15 minutos según Google Maps. Esta ruta se compone de cuatro tramos. El primer tramo consiste en una carretera urbana con un límite de velocidad de 50 Km/h. Este tramo tiene una longitud de 1.1 Km. El segundo tramo es autovía, con una longitud de 5.2 Km y un límite de velocidad de 120 Km/h. El tercer tramo es una carretera comarcal con una

longitud de 2 Km y un límite de velocidad de 100 Km/h. El cuarto tramo es una carretera urbana con una longitud de 0.880 Km y un límite de velocidad de 50 Km/h.



Figura 1: Ruta entre Getafe y Leganés (A).

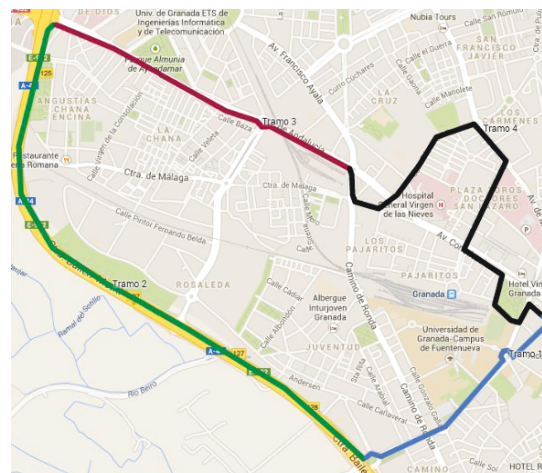


Figura 2: Ruta en Granada (España).

La ruta B tuvo lugar en Granada (España). Esta ruta B tiene una longitud de 8.3 Km y la duración según Google Maps es de 15 minutos. El trayecto se compone de cuatro tramos. El primer tramo es carretera urbana, la longitud es 1.2 Km y el límite de velocidad es 30 Km/h. El segundo tramo es autovía (límite de velocidad 100 Km/h) y la longitud es 3.2 Km. El tercer tramo (1.6 Km) es carretera urbana y tiene una longitud de 1.6 Km. En este tramo hay varios semáforos pero poca congestión de tráfico. El cuarto tramo es carretera urbana, tiene una longitud de 2.2 Km/h y el límite de velocidad es 50 Km/h.

La ruta C es un trayecto entre Sevilla y La Rinconada (España). La duración del viaje es de 13 minutos y su longitud es 10.05 Km. El trayecto fue dividido en cinco tramos. El primer tramo es carretera urbana, la longitud es de 0.6 Km y el límite de velocidad es 50 Km/h. El segundo tramo es autovía, la longitud es 0.650 Km y el límite de velocidad es 120 Km/h. El tercer tramo es carretera urbana. Su longitud es 2.4 Km y el límite de velocidad es 50 Km/h. El cuarto tramo es autovía, la longitud es 3.9 Km y el límite de velocidad es 120 Km/h. Finalmente, el

quinto tramo tiene una longitud de 2.5 Km y es carretera urbana. El límite de velocidad es de 50 Km/h. En las figuras 1, 2 y 3 podemos ver las rutas utilizadas en las pruebas. Las rutas se componen de un conjunto de tramos. El algoritmo propuesto estima la velocidad media óptima para cada uno de los tramos. En las figuras cada tramo se representa de un color: tramo 1 (azul), tramo 2 (verde), tramo 3 (rojo), tramo 4 (negro) y tramo 5 (marrón).



Figura 3: Ruta entre Sevilla y la Rinconada (C).

Para obtener el consumo de combustible, la velocidad del vehículo y la distancia recorrida empleamos el puerto de diagnóstico OBD2 [Baltusis, 2004]. Para ello conectamos un adaptador Bluetooth al puerto OBD2. Este adaptador envía los datos suministrados por el puerto de diagnóstico al dispositivo móvil Android que almacena la telemetría. Para realizar las pruebas empleamos el adaptador OBDLink de la empresa scantool.net. OBDLink permite tomar hasta 10 muestras por segundo.

El puerto de diagnóstico (OBD I) fue propuesto en 1984 para monitorizar la emisión de gases del vehículo. En 1988 se presentó la segunda versión de este puerto (OBD 2). OBD2 permiten monitorizar más variables que OBD 1 y su objetivo es poder hacer un diagnóstico en profundidad sobre el funcionamiento del vehículo. El puerto de diagnóstico OBD 2 está incluido en la mayoría de los vehículos actuales.

Es importante destacar que en numerosas ocasiones es difícil obtener el consumo de combustible, ya que el vehículo carece del sensor correspondiente. En ese caso, podemos emplear otras fuentes de información como el flujo de masa de aire (MAF sensor), presión efectiva, velocidad del motor y ratio aire/consumible. En [Riener et al., 2012] podemos encontrar más información sobre como estimar el consumo de combustible y su relación con la emisión de gases contaminantes.

En las pruebas realizadas se emplearon dos ecuaciones diferentes dependiendo del tipo de motor: gasolina (9) o diésel (10). En los motores gasolina se dosifica el combustible de manera proporcional a la masa de aire. En el caso de los motores

diésel, el consumo varía en función de la aceleración y el régimen del motor. Este método para estimar el consumo de combustible fue formulado por [Higgins and Williams, 2012].

$$\text{Consumo vehículo gasolina} \left(\frac{l}{h} \right) = \frac{\text{Mass Air Flow} \times 3600}{\text{AFR} \times 1000 \times \text{densityFuel}} \quad (9)$$

donde Mass Air Flow es el flujo de masa de aire (gramos/segundo), AFR es el ratio Aire/Combustible (gramos) y densityFuel es la densidad de la gasolina (Kg/l).

$$\text{Consumo vehículo diesel} \left(\frac{l}{h} \right) = \frac{\frac{\text{RPM}}{\text{ED} \times 180} \times \text{EstTorq} \times 3600}{1000 \times \text{densityFuel}} \quad (10)$$

$$\text{EstTorque} = 4\pi \times \frac{(\text{TBrakeMax} \times \text{CLV}) + \text{FrictionT}}{\text{EngineEfficiency}} \quad (11)$$

donde RPM es la velocidad de giro del motor (r.p.m.), ED es la densidad de energía del combustible (Nm/kg), densityFuel es la densidad del combustible diésel (kg/l), TBrakeMax (Nm) es el par máximo conseguido a una determinada velocidad de giro del motor, FrictionT (Nm) es una estimación de las pérdidas de par que se producen debidos a la fricción, CLV (%) es la carga del motor y EngineEfficiency (%) es la eficiencia estimada del motor.

4.2. Impacto de las condiciones de la carretera, aceleraciones y velocidad media en el consumo de combustible

En la figura 4, 5 y 6 podemos ver la relación entre velocidad media y consumo de combustible en los diferentes tramos que componen las rutas. La velocidad media en cada tramo se ha calculado tomando muestras de la velocidad instantánea del vehículo cada segundo. Observando las figuras podemos concluir que cuando la velocidad media es demasiado baja el consumo de incremento ya que el motor se encuentra encendido durante más tiempo. Además, cuando el vehículo circula a velocidad baja, el motor no se encuentra en la región óptima de funcionamiento. La región óptima es aquella donde el consumo específico es menor y viene dada por la curva par-motor. Esta curva es diferente para cada vehículo. No obstante, en la mayoría de los casos se consigue cuando el conductor circula con marchas elevadas, el pedal acelerador se encuentra presionado 3/4 partes de su recorrido y la velocidad del motor se encuentra en un rango comprendido entre los 1500-2000 R.P.M. Los vehículos suelen incluir en el cuentarrevoluciones una zona verde que indica la región óptima de funcionamiento del motor. Por otra parte, cuando la velocidad es elevada, el porcentaje de aceleraciones bruscas (positivas y negativas) y la fuerza de resistencia aerodinámica se incrementan. Todo esto contribuye a un aumento en la demanda de energía.

En la tabla 5 se compara la velocidad media y el consumo de combustible bajo condiciones normales y en condiciones de tráfico denso durante todo el trayecto. Para realizar esta prueba se empleó la ruta A. La tabla contiene el valor medio obtenido tras completar cada tramo 10 veces. A la vista de los resultados obtenidos durante las pruebas podemos concluir que el tráfico denso influye de forma directa en la velocidad media y el consumo de combustible. Los sistemas para gestionar los flujos de vehículos deben tratar de maximizar la velocidad media de la carretera para minimizar las emisiones de gases contaminantes y la demanda de energía.

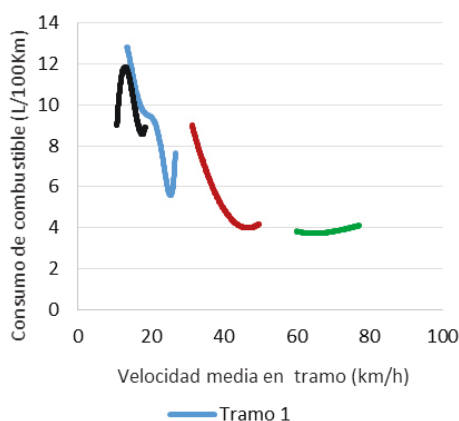


Figura 4: Velocidad Media vs Consumo de Combustible en ruta A.

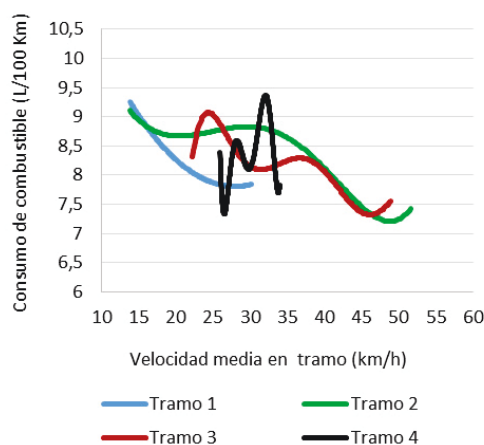


Figura 5: Velocidad Media vs Consumo de Combustible en ruta B.

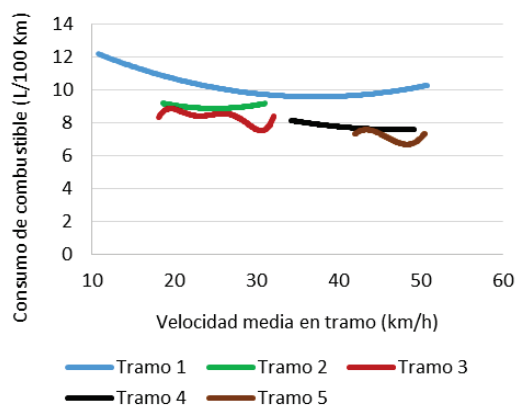


Figura 6: Velocidad Media vs Consumo de Combustible en ruta C.

A continuación, analizaremos las aceleraciones que se producen según el estado del entorno por donde circula el vehículo. La ruta empleada para hacer este análisis fue la A (trayecto entre Getafe y Leganés). La intensidad y frecuencia de las aceleraciones influye de forma directa en el consumo de

combustible. El conductor debe intentar minimizar y suavizar las aceleraciones (positivas y negativas). Los casos analizados son:

- A: Test con tráfico denso en todo el trayecto. El consumo de combustible fue de 6.28 L/100 Km.
- B: Test en condiciones de lluvia durante todo el trayecto. El consumo de combustible fue de 6.16 L/100 Km.
- C: Test con accidente de tráfico localizado al comienzo del seguro tramo. El consumo de combustible fue de 6.15 L/100 Km.
- D: Test en condiciones normales. El consumo de combustible fue de 5.69 L/100 Km.

Tabla 5: Velocidad media y consumo de combustible en Ruta A

Tramo	Velocidad Media (condiciones normales)	Velocidad Media (tráfico denso)	Consumo de combustible (condiciones normales)	Consumo de combustible (tráfico denso)
1	20.11	14.84	8.91	12.21
2	72.67	61.9	3.87	3.94
3	40.48	37.73	5.59	5.61
4	16.44	13.82	9.36	9.98

La figura 7 muestra el número de aceleraciones agrupadas por su intensidad en cada uno de los casos analizados. Por ejemplo, en la primera fila del gráfico indica que sólo ocurren aceleraciones superiores a 2.5 m/s^2 en el caso con lluvia (color rojo). La segunda fila muestra el número de aceleraciones, con intensidad comprendida entre 1.5 m/s^2 y 2.5 m/s^2 , que se producen en cada uno de los casos analizados. El resto de filas se corresponden con otros intervalos de aceleraciones considerados. Los resultados muestran que en el caso A (tráfico denso), el número de desaceleraciones en el rango -1.5 m/s^2 a -0.5 m/s^2 es mayor que en el caso D (las condiciones de la carretera son normales). La intensidad de las aceleraciones (positivas y negativas) no es muy alta porque el conductor no puede circular a altas velocidades. Sin embargo, el número de aceleraciones y desaceleraciones de baja intensidad se incrementa de forma drástica en comparación con el caso D (condiciones normales) debido a que el conductor se ve obligado a parar y reanudar la marcha continuamente.

En el test B, lluvia en todo el trayecto, se producen muchas desaceleraciones de baja intensidad (intervalo $[-0.5 \text{ } 0]$). El conductor se ve obligado a reducir la velocidad constantemente debido a la pobre adherencia de la carretera. En el test C, el número de aceleraciones en el rango $[-1.5 \text{ } -0.5]$, $[0.5 \text{ } 1.5]$ y $[1.5 \text{ } 2.5]$ es mayor que en el resto de los casos porque el accidente obliga a que los vehículos tengan que disminuir la velocidad hasta pasar el lugar donde se encuentra el accidente. Una vez que los conductores abandonan el lugar del accidente, instintivamente aumentan la velocidad para recuperar el tiempo perdido. La velocidad que adquieren no es la adecuada por lo que se ven obligados a frenar.

Finalmente, en el caso D (no hay ningún tipo de incidencia), el número de aceleraciones (positivas y negativas) se reducen de forma significativa. Comparando el número total de aceleraciones del caso A con el D, las aceleraciones se redujeron un 15.5 %. En el caso B un 63.09% y en el caso C un 26.62%.

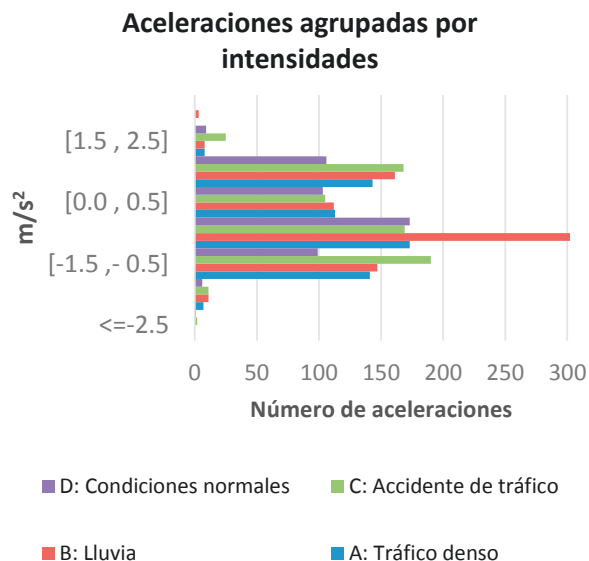


Figura 7: Intensidad de las aceleraciones en escenarios de lluvia, accidente de tráfico, tráfico denso y sin incidentes.

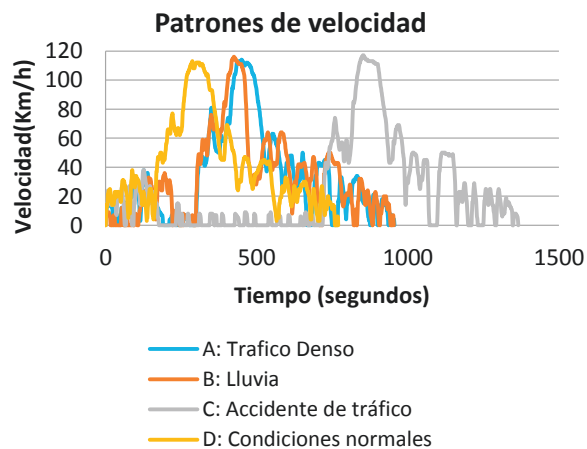


Figura 8: Patrones de velocidades.

La figura 8 muestra la velocidad instantánea obtenida en los tests A. B. C y D. En el caso D (condiciones normales) observamos que no se producen tantas aceleraciones seguidas de desaceleraciones en las que el usuario emplea el pedal freno. Esto tiene un efecto directo en el consumo de combustible ya que la energía demandada al acelerar no se desperdicia al frenar. Cuando el conductor emplea el pedal freno, la energía generada por el motor se pierde en forma de calor en los frenos. Sin embargo, cuando frenamos con el “freno motor”, la energía producida se emplea para desplazar el vehículo hasta el punto donde se detiene. El “freno motor” consiste en dejar de pisar el acelerador, En ese momento se invierte el funcionamiento del vehículo y las ruedas son las que hacen girar al motor. Dependiendo de la marcha que se lleve seleccionada, el motor retendrá más o menos el vehículo.

En el caso de que la marcha no se encuentre engranada, el consumo de combustible no es cero ya que la unidad de control inyecta energía para evitar que el motor se detenga. Por lo tanto, el conductor debe evitar circular en punto muerto para reducir el consumo de combustible. Además, circular sin marcha engranada puede provocar que el conductor pierda el control del vehículo.

En el caso C (accidente de tráfico en el tramo 2) se producen numerosas variaciones en la velocidad. Estas variaciones de velocidad suponen un aumento en la demanda de energía respecto al caso D. Además, una vez que el conductor pasa el lugar del accidente aumentan la velocidad para recuperar el tiempo que se encontró detenido. Este aumento de la velocidad implica un aumento en la frecuencia de las aceleraciones (positivas y negativas) porque el conductor no conduce a una velocidad adecuada al tipo y estado de la carretera. Al mismo tiempo, cuando el vehículo circula a alta velocidad, el consumo de combustible aumenta debido a la fuerza de resistencia aerodinámica. Esta fuerza se incrementa de forma cuadrática en función de la velocidad. No obstante, en los vehículos más modernos se ha mejorado la aerodinámica por lo que el efecto en el consumo de energía es menor que en los vehículos antiguos. Por otra parte, podemos observar que en esta situación (accidente de tráfico en uno de los trayectos que componen la ruta) la duración del trayecto se incrementó drásticamente respecto al resto de casos.

Los casos A y B presentan un perfil de velocidad muy parecido tanto en forma como duración. Estos dos casos están muy relacionado porque cuando llueve los conductores reducen la velocidad por seguridad y se producen atascos. El impacto en el tráfico de las condiciones meteorológicas depende de la intensidad con la que llueva o nieve, la temperatura y el tipo de carretera. En el caso analizado la lluvia era moderada por lo que la densidad de tráfico no era tan grande como en el caso A y el consumo de combustible fue menor. En el caso B (lluvia moderada) el consumo fue de 6.16 L/100 Km frente a los 6.28 L/100 Km del caso A (tráfico denso).

4.3. Evaluación del algoritmo estimador de velocidad

El algoritmo fue ejecutado en un Galaxy Nexus. Las características de este móvil las podemos encontrar en la tabla 6.

Para obtener el número de paradas estimadas hemos considerado el número de rotondas y semáforos que hay que cada tramo más dos paradas estimadas. Las dos paradas estimadas se añaden para simular la variación de velocidad que se produce al principio y final de cada tramo. Hemos empleado esta aproximación porque en las rutas elegidas la velocidad está limitada por este tipo de elementos. Sin embargo, podríamos cambiar de criterio según las características de la vía.

Tabla 6: Características técnicas del Galaxy Nexus

Velocidad Procesador	1.2 Ghz
Tipo Procesador	ARM Cortex A9
SOC (System On Chip)	Texas Instruments OMAP 4460
GPU	PowerVr SGX540
Memoria RAM	1GB
Tipo de RAM	LDDR2
Versión Android	4.1.1

Tabla 7: Resultados obtenidos tras ejecutar el algoritmo estimador de velocidad 20 veces por cada tramo y ruta

Tramo		Ruta A	Ruta B	Ruta C
1	Velocidad (Km/h)	24.50	28.14	36.68
	Desviación estándar	0.05	0.07	0.11
2	Velocidad (Km/h)	68.00	63.39	25.02
	Desviación estándar	0.30	0.02	0.01
3	Velocidad (Km/h)	49.85	48.01	27.80
	Desviación estándar	0.02	0.01	0.10
4	Velocidad (Km/h)	17.93	25.30	47.31
	Desviación estándar	0.10	0.06	0.57
5	Velocidad (Km/h)			45.56
	Desviación estándar			0.15

En la tabla 7 podemos ver los resultados del algoritmo propuesto. Para cada tramo se muestra la velocidad media obtenida tras ejecutar el algoritmo 20 veces y la desviación estándar. Nosotros podemos observar como en todos los casos el valor de desviación estándar es bajo por lo que la solución es redundante y no alcanza un mínimo local. En todas las pruebas, la población inicial fue de 500 individuos. En las etapas de selección, el algoritmo escoge primero los 10 individuos con mejor fitness, y en la segunda etapa se escogen los 5 individuos con menor tiempo de trayecto de los 10 seleccionados en la etapa previa.

En la tabla 8, 9 y 10 se muestra el consumo de combustible medio obtenido por un grupo de 10 conductores en cada una de las rutas (A, B y C). Cada conductor realizó el trayecto 20 veces. En las diez primeras veces el asistente estaba desactivado. En el resto, el sistema indicaba al usuario la velocidad óptima. En las tablas, la primera columna contiene el consumo de combustible medio obtenido cuando el asistente de velocidad está desactivado. La segunda columna muestra el consumo cuando se informa al usuario sobre la velocidad media óptima en cada uno de los tramos de los que se compone el trayecto. En todas estas pruebas no se produjo ningún tipo de incidente. En la ruta A, los conductores lograron ahorrar de media un 7.23% de combustible y la desviación estándar fue de 3.96. En la ruta B, un 7.55% y el valor de desviación estándar fue 3.96 y en la ruta C un 7.96% con una desviación estándar de 2.95. Aplicando el t-test, en la ruta A se obtiene un valor de 0.00036, en la ruta B el valor del t-test es 0.0004 y en la ruta C es 0.000002. Considerando la hipótesis nula como “no hay mejoras en el consumo de combustible cuando se le recomienda al usuario una velocidad media”, como el p-value en cada ruta es menor de 0.05 [O'Connor et al, 2013] puede ser rechazada. De esta forma se demuestra que el ahorro de energía no se debe a factores aleatorios.

Tabla 8: Consumo de combustible en ruta A

Conductor	Estimador de velocidad desactivado (L/100 Km)	Estimador de velocidad activado (L/100 Km)	Porcentaje de ahorro de combustible (%)
A	6.75	6	11.14
B	5.95	5.67	4.62
C	6.08	5.98	1.64
D	6.83	5.91	13.58
E	6.69	5.80	13.43
F	6.28	5.77	8.12
G	6.13	5.85	4.50
H	6.02	5.75	4.35
I	5.95	5.69	4.33
J	6.17	5.76	6.62

Tabla 9: Consumo de combustible en ruta B

Conductor	Estimador de velocidad desactivado (L/100 Km)	Estimador de velocidad activado (L/100 Km)	Porcentaje de ahorro de combustible (%)
A	9.34	8.21	12.17
B	8.85	8.24	6.89
C	9.93	8.76	11.83
D	8.38	8.30	0.89
E	8.89	7.89	11.34
F	7.80	7.02	9.98
G	9.15	8.02	12.35
H	8.21	8.18	0.35
I	7.99	7.67	4.02
J	7.92	7.47	5.77

Tabla 10: Consumo de combustible en ruta C

Conductor	Estimador de velocidad desactivado (L/100 Km)	Estimador de velocidad activado (L/100 Km)	Porcentaje de ahorro de combustible (%)
A	7.85	6.86	12.53
B	8.21	7.18	12.47
C	8.52	7.94	6.88
D	7.31	6.92	5.34
E	7.37	6.83	7.40
F	7.45	6.78	8.91
G	7.20	6.63	7.79
H	7.20	6.47	10.25
I	7.05	6.80	3.52
J	6.97	6.65	4.54

5. Conclusiones

En este trabajo hemos propuesto un algoritmo para obtener la velocidad media óptima. Cuando la velocidad media es demasiado baja, el tiempo que el motor se encuentra encendido se incrementa, y con ello el consumo total. Por otra parte, si la velocidad media es demasiado alta, el conductor se ve obligado a acelerar y frenar bruscamente con el consiguiente desperdicio de energía. Ajustar la velocidad media a la longitud y tipo de tramo, y a las condiciones actuales de la carretera permite ahorrar una gran cantidad de combustible.

El algoritmo ha sido validado mediante pruebas en tres escenarios reales con diferentes condiciones ambientales y de tráfico. Los resultados muestran que los conductores pueden ahorrar entre un 7 % y un 8% de combustible utilizando el sistema propuesto. No obstante, el porcentaje de ahorro depende del estado de la carretera y de la habilidad del conductor para ajustar la velocidad.

El algoritmo fue ejecutado en un dispositivo móvil Android. Este tipo de dispositivos son idóneos para modelar el entorno por donde circula el vehículo gracias a sus múltiples conexiones y sensores. Además, en los últimos años la potencia de cálculo de estos dispositivos se ha incrementado exponencialmente por lo que permiten ejecutar algoritmos complejos como el propuesto. Una sección de conclusiones no es necesaria. Sin embargo, las conclusiones pueden revisar los puntos más importantes de un artículo, pero no debe replicarse el resumen en las conclusiones. Las conclusiones pueden tratar sobre la importancia del trabajo realizado o sugerir aplicaciones o trabajos futuros.

Agradecimientos

The research leading to these results has received funding from the ARTEMISA project TIN2009-14378-C02-02 within the Spanish "Plan Nacional de I+D+I" and from the Spanish Ministerio de Economía y Competitividad funded projects IRENE (PT-2012-1036-370000), COMINN (IPT-2012-0883-430000) and REMEDISS (IPT-2012-0882-430000) within the INNPACTO program.

Referencias

- af Wahlberg A., 2007. Long-term effects of training in economical driving: fuel consumption, accidents, driver acceleration behaviour and technical feedback. *International Journal of Industrial Ergonomics* 37. 333–343. DOI: 10.1016/j.ergon.2006.12.003
- Baltusis P., 2004. On-board vehicle diagnostics. SAE 2004-21-0009.
- Barbé J., Boy G., 2006. On-board system design to optimize energy management. *Proceedings of the European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control Control (EAM'06)*. France.
- Barth M., Boriboonsomsin K., 2009. Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 14. 400-410. DOI: 10.1016/j.trd.2009.01.004
- Boriboonsomsin K., Vu A., Barth M., 2010. CoEco-Driving: Pilot Evaluation of Driving Behavior Changes among U.S. Drivers. University of California, Riverside.
- Casavola A., Prodi G., Rocca G., 2010. Efficient gear shifting strategies for green driving policies. *American Control Conference (ACC)*. 4331-4336.
- Ericsson E. 2001. Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 6. 325-345. DOI: 10.1016/S1361-9209(01)00003-7
- Johansson H., Gustafsson, P. Henke, M., Rosengren, 2003. *Proceedings from the 12th Symposium, Transport and Air Pollution Conference, Avignon, 2003*.
- Haworth N., Symmons M., 2001. The relationship between fuel economy and safety outcomes. Victoria. Australia: Monash University. 1–57.
- Hegerty, B., Hung, C. C., Kasprak, K., 2009. A Comparative Study on Differential Evolution and Genetic Algorithms for Some Combinatorial Problems. URL: <http://www.micai.org/2009/proceedings/.../cd/ws.../paper88.micai09.pdf>.
- Higgins, P., Williams, G., 2012. Vehicle Fuel Consumption Calculator. U.S. Patent No. 8,340,925. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Koskinen O. H., 2008. Improving vehicle fuel economy and reducing emissions by driving technique. *Proceedings of the 15th ITS World Congress*. New York.
- Lindfeldt E. G., Saxe M., Magnusson M., Mohseni F., 2010. Strategies for a road transport system based on renewable resources – The case of an import-independent Sweden in 2025. *Applied Energy* 87. 1836–1845. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.02.011
- Mukay Y., Kanoh H., 2008. Wide-area traffic signal control using predicted traffic based on real-time information. *Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. Beijing, China, October 12-15, 2008.
- O'Connor J.J., Robertson F. E., "Student's t-test," *MacTutor History of Mathematics archive*, University of St Andrews, <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Gosset.html>
- Riener A., Ferscha, A., Frech P., Hackl M., Kaltenberger M., 2010. Subliminal vibro-tactile based notification of CO2 economy while driving. *2nd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications AutomotiveUI 2010*, November 11-12, 2010, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, ACM, ISBN: 978-1-4503-0437-5, pp. 92-101.
- Saboochi Y., Farzaneh H., 2010. Model for developing an eco-driving strategy of a passenger vehicle based on the least fuel consumption. *Applied Energy* 86. 1925–1932. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.12.017
- Van Mierlo J., Maggetto G., Van de Burgwal E., Gense R., 2004. Driving style and traffic measures-influence on vehicle emissions and fuel consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 1. 35-40. DOI: 10.1243/095440704322829155
- Villeta M., Lahera T., Merino D., Zato J.G., Naranjo J. E., Jiménez F., 2012. Modelo para la Conducción Eficiente y Sostenible basado en Lógica Borrosa. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 9. 259–266. DOI: 10.1016/j.riai.2012.05.009